

# 비고유 특징을 갖는 의미정보를 이용한 지상 자율이동체 측위 기법

## Autonomous Ground Vehicle Localization Filter Design Using Landmarks with Non-Unique Features

김 찬 영\* · 홍 다니엘\*\* · 나 원 상\*  
(Chan-Yeong Kim · Daniel Hong · Won-Sang Ra)

**Abstract** - This paper investigates the autonomous ground vehicle (AGV) localization filter design problem under GNSS-denied environments. It is assumed that the given landmarks do not have unique features due to the lack of *a priori* knowledge on them. For such case, the AGV may have difficulties in distinguishing the position measurement of the detected landmark from those of other landmarks with the same feature, hence the conventional localization filters are not applicable. To resolve this technical issue, the localization filter design problem is formulated as a special form of the data association determining whether the detected feature is actually originated from which landmark. The measurement hypotheses generated by landmarks with the same feature are evaluated by the nearest neighbor data association scheme to reduce the computational burden. The position measurement corresponding to the landmark with the most probable hypothesis is used for localization filter. Through the experiments in real-driving condition, it is shown that the proposed method provides satisfactory localization performance in spite of using non-unique landmarks.

**Key Words** : GNSS-denied environment, Vision-based localization, Non-unique features, Measurement hypotheses

### 1. 서 론

지상 자율이동체(AGV: autonomous ground vehicle)가 주어진 임무를 성공적으로 수행하기 위해서는 정밀 측위(localization) 기술이 뒷받침되어야 한다. 이에 대한 가장 기본적인 해법은 추측항법(dead-reckoning) 기술을 활용하는 것이다. 추측항법 알고리즘은 초기 위치에 대해 AGV에 탑재된 센서로부터 획득된 가속도 혹은 속도정보를 지속적으로 적분하는 구조를 갖고 있어 시간이 지남에 따라 측위오차가 지수적으로 증가하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서는 간헐적으로 위치정보를 제공하지만 그 오차가 제한되어 있는 보조센서의 도움이 필수적이다. 즉, 측위필터를 통해 상호보완적인 관계에 있는 추측항법 정보와 보조센서 정보를 융합함으로써 측위오차의 증가를 효과적으로 억제할 수 있다[1-3].

실외에서 운용되는 대부분의 AGV는 측위필터 설계 시 GPS(global positioning system)로 대표되는 광역 위성항법 시스템(GNSS: global navigation satellite system)을 보조센서로 이용

하고 있다. 그 이유는 AGV에 저가의 수신기를 장착하는 것만으로도 비교적 만족할 만한 위치보정 데이터를 획득할 수 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고, AGV가 고층건물의 밀집으로 인한 전파차폐, 의도적인 전파방해(jamming 혹은 spoofing), 더 나아가 GNSS 전파를 아예 수신할 수 없는 지역에서 임무를 수행하는 경우에는 측위필터 설계를 위한 별도의 대책이 마련되어야 한다[4,5].

GNSS 수신불가능 상황에서도 AGV의 항법정보를 안정적으로 산출하기 위해 지금까지 다양한 방법들이 연구되어 왔다. 그 중 가장 손쉽게 구현 가능한 현실적 해법은 지형지물, 인공표식 등 의미정보(landmark)가 가지고 있는 고유한 특징(unique feature)과 이에 대응하는 의미정보의 절대위치를 활용하는 것이다[6,7]. 즉, AGV에 장착된 영상센서 등으로부터 의미정보의 특징이 인식되면 탑재된 데이터베이스에서 해당 의미정보의 절대위치를 확인하여 이를 위치보정 정보로 쓸 수 있다. 이러한 아이디어는 영상 기반 TRN(terrain relative navigation), SLAM(simultaneous localization and mapping), VO(visual odometry) 등으로 구현되어 실제 시스템에 적용된 바 있다[8-10]. 하지만, 이 방법은 AGV의 임무수행 지역 내에 고유 특징을 갖는 의미정보들을 특정할 수 없는 경우 절대위치 추정이 어려운 것으로 알려져 있다[11,12]. 이러한 문제를 해결하기 위해 사전에 그 위치가 알려져 있으나 특징정보를 지니고 있지 않은 의미정보들을 다수 활용하여 측위필터를 설계하는 방법이 제시되기도 하였다. 하지만, 이들 방법은 의미정보의 개수가 충분하지 않거나 의미정보의 특징과 절대위치가 다대다 대응관계에 있는 복잡한 환경에는 적용이 불

\* Corresponding Author : School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University, Korea.

E-mail: wonsang@handong.edu

\* School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University, Korea.

\*\* Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea.

Received : July 28, 2018; Accepted : September 27, 2018

가능하다는 한계를 지닌다.

본 논문에서는 기존 측위필터의 한계를 극복하기 위해 GNSS 수신불가능 상황에서 비 고유(non-unique) 특징을 갖는 의미정보들을 활용한 AGV 측위필터 설계 방안을 제시한다. 본 논문에서 고려하는 측위 문제는 같은 특징을 공유하는 의미정보들이 여럿 존재하여 의미정보의 절대위치로 직접적인 위치보정이 불가능한 상황을 다룬다는 측면에서 기존 문제설계와 분명한 차이점이 있다. 특히, 의미정보들이 포함하고 있는 특징이 여러 종류로 구분되는 경우를 다룬다는 점에서 GNSS 수신불가능 상황에 적용 가능한 보다 일반화된 측위필터 설계 방법론이라 할 수 있다. 측위필터 설계를 위해 먼저 적은 계산량으로 의미정보 검출 시까지 AGV의 운동을 예측하기 위해 AHRs(attitude heading reference system)에서 자세 및 고도정보가 주어진다 가정 하에 고차 항법방정식을 단순화하여 동체 가속도를 입력으로 하는 수평면 운동방정식을 모델링하고, 이를 AGV의 위치 및 속도 예측에 활용한다. AHRs 및 가속도계 오차에 의해 누적된 상태변수 예측오차는 영상센서에 의해 인식된 비 고유 의미정보의 상대위치 측정치를 이용하여 억제된다. 이때, 주어진 특징이 고유하지 않은 경우 같은 특징을 갖는 의미정보가 여러 개 도출되므로 어떠한 의미정보의 절대위치를 이용하여 측위필터의 측정치 갱신을 수행해야 할지가 매우 모호해진다. 이 때문에 비 고유 의미정보 기반 측위 문제의 해를 찾기가 매우 어려워진다. 영상센서에서 인식된 의미정보의 비 고유 특징과 이에 해당하는 의미정보의 절대위치가 일대일 대응관계를 갖지 않으므로, 의미정보가 인식될 때마다 필연적으로 다수의 측정치가 생성된다. 본 논문에서는 비 고유 의미정보가 야기하는 측정치 모호성을 처리하기 위해 전통적인 자료연관(data association) 개념이 도입된다. 즉, 인식된 특징이 실제로 어떤 의미정보로부터 유래된 것인지를 판별함으로써, 측정치와 연관된 의미정보의 실제 위치를 추론하는 방식을 취한다[13]. 제안한 방법은 확률적도에 기반하여 측정치 가설 평가가 이루어지는 자료연관 필터 구조를 지니고 있어 의미정보 오검출에 따라 일시적으로 측위성능이 저하되더라도 상대적으로 안정적인 측위성능을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

제안된 기법의 유용성을 확인하기 위해 실제 도로주행 시나리오에 대해 성능분석이 수행된다. 이를 위해, 도로표지판을 비 고유 의미정보로 간주하고 측정치 가설검증에 기초한 측위필터가 적용된다. 성능분석 결과를 통해, 제안한 측위필터가 비 고유 의미정보를 사용함에도 불구하고 안정적인 위치/속도 추정치를 제공함을 확인한다.

## 2. 비 고유 의미정보를 이용한 측위필터 설계

본 논문에서는 의미정보가 지니고 있는 특징이 구체적이지 않아 동일한 특징을 공유하는 의미정보가 다수 존재하는 경우를 일컬어 『비 고유 의미정보』라는 용어를 사용한다. 이러한 상황은 AGV의 임무수행 지역에 대한 사전정보가 부족할 때 빈번하게 발생할 수 있다. 예를 들어, 동일한 특징 'F'를 갖지만 실제로는 서로 다른 두 개의 의미정보 L1 및 L2가 AGV의 이동 경로

상에 위치하고, AGV는 특징 'F'를 공유하는 의미정보(L1, L2)의 위치(P1, P2)를 사전에 알고 있다고 가정해보자. 이 경우, 영상센서가 의미정보의 특징 'F'를 성공적으로 인식하더라도, L1과 L2 중 과연 어떤 의미정보로부터 특징 'F'가 검출된 것인지 구분할 수 없다. 다시 말해, 의미정보가 지닌 특징의 비 고유성으로 인해 인식된 특징 'F'만으로는 AGV의 위치가 P1 근방인지, P2 근방인지 판별할 수 없다. 본 절에서 제시될 측위필터의 궁극적인 설계 목표는 이렇듯 비 고유 의미정보들이 존재하는 상황 하에서 실제 영상센서가 어떤 의미정보의 특징을 검출한 것인지 스스로 구분하고, 더 나아가 AGV의 위치/속도 정보를 산출해 내는 데 있다.

측위필터 설계를 위한 기본 가정은 아래와 같다.

- A1) 관성 가속도계에서 AGV 동체 가속도가 획득된다.
- A2) AHRs로부터 AGV의 자세정보가 획득된다.
- A3) 기압고도계에서 AGV의 고도정보를 얻을 수 있다.
- A4) 사전에 임무수행 지역에 대한 비 고유 의미정보의 특징과 절대위치 데이터베이스가 주어진다.
- A5) AGV는 중심위치가  $(\bar{\lambda}, \bar{\lambda})$ 이고 제한된 반경을 갖는 지역 내를 주행한다.
- A6) 비 고유 의미정보와 AGV에 탑재된 영상센서 사이의 고도 차이는 무시할 만하다.

### 2.1 측위필터 설계 모델

#### 2.1.1 좌표계 정의

- 관성좌표계(I-frame)

지구중심을 원점으로 하고, 원점에서 춘분점을 잇는 벡터를  $X_I$ 축, 지구자전축을  $Z_I$ 축으로 하는 직교좌표계로 AGV의 운동방정식 기술을 위한 기준이 된다.

- 지구고정좌표계(E-frame)

지구중심을 원점으로 하고, 원점에서 적도평면과 본초자오선(Greenwich meridian)이 만나는 지점을 잇는 벡터를  $X_E$ 축, 지구자전축을  $Z_E$ 축으로 하는 직교좌표계이다. 지구자전각속도를  $\omega_e$ 라 하면, I-frame에 대한 E-frame의 회전각속도벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\omega_{IE}^E = [0 \ 0 \ \omega_e]^T \quad (1)$$

- 항법좌표계(N-frame)

AGV의 위치에서 정의되는 WGS84 지구타원체의 접평면에 의해 정의된다.  $X_N$ 축을 정북방향,  $Y_N$ 축을 정동방향,  $Z_N$ 축을 수직하 방향으로 하는 NED좌표계이다. AGV의 위치, 즉 지리위도, 경도, 고도를  $\rho = [\lambda \ \lambda \ h]^T$ 라 하면, E-frame과 N-frame 간 좌표

변환 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$C_E^N = R_y(\lambda + \frac{\pi}{2})R_z(A) \quad (2)$$

여기서  $R_\lambda(\epsilon)$ 는  $\chi$ 축을 중심으로  $\epsilon$ 만큼 회전시킨 회전변환행렬을 의미한다. 좌표변환관계 (2)에 따라, E-frame에 대한 N-frame의 회전각속도벡터를 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\omega_{EN}^N = [-\dot{A}\cos\lambda \quad \dot{\lambda} \quad -\dot{A}\sin\lambda]^T \quad (3)$$

• 동체좌표계(B-frame)

AGV의 무게중심을 원점으로 하고 AGV의 전면방향을  $X_B$ 축, 수직 하 방향을  $Z_B$ 축으로 하는 오른손좌표계이다. N-frame과 다음 좌표변환 관계를 갖는다.

$$C_N^B = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \quad (4)$$

편의상 위의 식에서 오일러 각  $\psi, \theta, \phi$ 를 각각 AGV의 요, 피치, 롤 자세각으로 정의한다. N-frame에 대한 B-frame의 회전각속도벡터와 이를 이용하여 계산된 왜대칭행렬(skew-symmetric matrix)은 각각 다음과 같다.

$$\omega_{NB}^B = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \Omega_{NB}^B = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.1.2 수평면 운동방정식

일반적으로 AGV의 항법방정식은 3축 위치, 속도, 자세와 각속도 및 가속도 오차에 대한 15차 비선형 미분방정식으로 기술된다 [2].

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} &= \frac{1}{R_m+h} v_N, \dot{A} = \frac{1}{(R_t+h)\cos\lambda} v_E, \dot{h} = -v_D, \\ \dot{\mathbf{v}}^N &= C_B^N \mathbf{f}^B - 2(\omega_{IE}^N + \omega_{EN}^N) \mathbf{v}^N + \mathbf{g}^N, \\ \dot{C}_B^N &= C_B^N \Omega_{NB}^B, \dot{\mathbf{b}}_\omega = 0, \dot{\mathbf{b}}_a = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{f}^B = [f_x \ f_y \ f_z]^T$ 는 가속도계에서 측정되는 B-frame 비력 벡터,  $\mathbf{v}^N = [v_N \ v_E \ v_D]^T$ 는 AGV의 N-frame 속도벡터,  $\mathbf{g}^N \approx [0 \ 0 \ g]^T$ 는 N-frame 중력벡터 성분,  $\mathbf{b}_\omega$  및  $\mathbf{b}_a$ 는 각각 각속도계 및 가속도계 바이어스 오차,  $R_m$ 은 자오선 곡률반경,  $R_t$ 는 횡 곡률반경을 나타낸다.

AGV의 특성상 수직면 보다 수평면 항법정보가 상대적으로 더 중요한 역할을 한다는 점에 착안하여 탑재된 센서정보를 이용하여 15차 비선형 미분방정식 (6)을 단순화 해보자. 가정 A2 및 A3를 적용하면, 식 (6)은 다음과 같이 4차 비선형 미분방정식으로 간략화 된다.

$$\dot{\mathbf{x}} \approx \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (7)$$

여기서 상태변수  $\mathbf{x}$ 와 함수  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 의 정의는 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \lambda \\ A \\ v_N \\ v_E \end{bmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{v^N}{R_m+h} \\ \frac{v^E}{(R_t+h)\cos\lambda} \\ f_N - 2\omega_e v_E \sin\lambda - \frac{v_E^2 \tan\lambda}{R_t+h} \\ f_E + 2\omega_e v_N \sin\lambda + \frac{v_N v_E \tan\lambda}{R_m+h} \end{bmatrix}, \mathbf{f}^N = \begin{bmatrix} f_N \\ f_E \\ f_D \end{bmatrix} = C_B^N \mathbf{f}^B$$

또한, 가정 A5에 따라 다음 근사식이 성립된다.

$$R_m \approx \frac{R_e(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\lambda)^{3/2}}, R_t \approx \frac{R_e}{(1-e^2\sin^2\lambda)^{1/2}} \quad (8)$$

위의 식에서  $R_e$ 은 지구장반경,  $e$ 은 이심률을 나타낸다.

필터 설계를 위해 필터의 샘플링 주기를  $T_s$ 라 하고, 오일러 기법을 이용하여 연속시간 미분방정식 (7)을 이산화 하면 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k, \mathbf{f}(\mathbf{x}_k) = \mathbf{x}_k + T_s \mathbf{g}(\mathbf{x}_k) \quad (9)$$

위의 식에서  $\mathbf{w}$ 는 이산화 된 운동방정식 (9)의 모델링 오차를 반영하기 위해 도입된 공정잡음으로 편의상 분산이  $Q$ 인 영평균 백색잡음으로 가정한다.

2.1.3 고유 의미정보에 대한 측정 방정식

의미정보의 비고유성을 다루기에 앞서, 의미정보의 고유한 특징이 주어진 경우에 대한 측정방정식을 유도해보자. AGV에 탑재된 영상센서를 이용하여 획득 가능한 정보는 다음 두 가지로 구분된다.

M1) AGV에 대한 의미정보의 B-frame 수평면 상대위치

$$\Delta \mathbf{p}_t^B = [\Delta x_t^B \ \Delta y_t^B]^T$$

M2) 인식된 특징정보에 해당하는 의미정보의 N-frame 수평면

$$\text{위치 } \mathbf{l}_t = [\lambda_t \ A_t]^T$$

센서 출력정보 M1은 항상 유일하게 결정되는 반면, 의미정보에 대응하는 위치정보 M2는 사전에 주어진 특징정보가 고유한지 혹은 그렇지 않은지 여부에 따라 유일하지 않을 수도 있다는 점에 유의할 필요가 있다. 이에 대한 처리 방안은 2.2절에서 보다 상세하게 다룬다.

한편, 가정 A5 및 A6에 따라 AGV의 N-frame 수평면 위치  $\mathbf{l} = [\lambda \ A]^T$ 와 의미정보의 B-frame 상대위치  $\Delta \mathbf{p}_t^B = [\Delta x_t^B \ \Delta y_t^B]^T$  사이에는 다음 변환관계가 존재한다.

$$\Delta \mathbf{l}_i = \mathbf{l}_i - \mathbf{l} = T \Delta \mathbf{p}_i^B, \quad T = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_m} & 0 \\ 0 & \frac{\sec(\bar{\lambda})}{R_t} \end{bmatrix} C_B^N \quad (10)$$

위의 식에서 변환행렬  $T$ 는 가정 A2에 따라 AHRS에서 제공되는 자세각 정보를 이용해 계산 가능하다.

실제상황에서는 영상센서 출력에는 부가(additive) 측정잡음  $\mathbf{v}_p = [\delta x_t \ \delta y_t]^T$ 가 포함되어 있으므로 B-frame 상대위치 측정치  $\mathbf{z} = \Delta \tilde{\mathbf{p}}^B$ 를 다음과 같이 쓸 수 있다

$$\mathbf{z} = \Delta \tilde{\mathbf{p}}^B = \Delta \mathbf{p}^B + \mathbf{v}_p \quad (11)$$

식 (11)에서 측정잡음  $\mathbf{v}_p$ 는 편의상 평균이 0이고 분산이  $R_p$ 인 백색잡음으로 가정한다.

이제 식 (11)을 식 (10)에 대입하면, 영상센서 측정치(M1 정보)와 의미정보의 절대위치(M2 정보)를 활용하여 산출된 AGV의 위치측정치  $\mathbf{y}$ 와 상태변수  $\mathbf{x}$ 간의 관계를 모델링할 수 있다.

$$\mathbf{y} = H\mathbf{x} + \mathbf{v}, \quad \mathbf{v} \sim N(0, R) \quad (12)$$

식 (12)에 사용된 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{l}_i - T\mathbf{z}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = -T\mathbf{v}_p, \quad R = TR_p T^T$$

### 2.1.4 고유 의미정보를 이용한 측위필터

기존 측위필터는 모든 의미정보가 고유한 특징을 갖고 있다는 전제하에 설계된다. 앞서 유도된 이산시간 비선형 시스템방정식 (9) 및 측정방정식 (12)에 확장칼만필터를 적용하면 손쉽게 AGV의 위치 및 속도를 추정할 수 있다.

$$P_k^{-1} = \bar{P}_k^{-1} + H^T R^{-1} H, \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \bar{\mathbf{x}}_k + P_k H^T R^{-1} (\mathbf{y}_k - H \bar{\mathbf{x}}_k)$$

$$\bar{P}_{k+1} = F_k P_k F_k^T + Q, \quad F_k = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}_k} \quad (14)$$

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_k)$$

## 2.2 비 고유 의미정보에 의한 측정치 모호성 처리

### 2.2.1 문제정의

식 (12)에서 위치측정치  $\mathbf{y}$ 가 영상센서에서 측정된 의미정보의 상대위치  $\mathbf{z}$ 와 의미정보의 절대위치  $\mathbf{l}_i$ 로 계산된다는 사실에 주목하자. 의미정보까지의 상대위치  $\mathbf{z}$ 는 영상센서에서 제공되는 M1 정보를 이용하여 산출가능하며 여기에는 측정잡음이 포함되어 있을 뿐, 정보 자체의 모호성은 존재하지 않는다. 이와 달리, 영상센서가 인식한 의미정보의 특징이 고유하지 않은 경우, 비 고유

특징에 대응하는 의미정보의 절대위치  $\mathbf{l}_i$ (M2 측정치)는 유일하게 결정되지 않는다.

만일  $k$ 시점에서 영상센서에 의해 인식된 특징을 갖고 있는 의미정보가 대상 지역 내에  $N$ 개 존재한다면, 측정치  $\mathbf{y}_k$  산출에 사용될 수 있는 의미정보의 절대위치  $\mathbf{l}_{i,k}$ 은 집합  $\mathcal{L}_k$ 의 원소 중 하나가 된다.

$$\mathcal{L}_k = \{\mathbf{l}_{i,k}^1, \mathbf{l}_{i,k}^2, \dots, \mathbf{l}_{i,k}^i, \dots, \mathbf{l}_{i,k}^N\} \quad (15)$$

따라서 측정치  $\mathbf{y}_k$  역시 다음 집합  $\mathcal{M}_k$ 의 원소이다.

$$\mathcal{M}_k = \{\mathbf{y}_k^i | \mathbf{y}_k^i \equiv \mathbf{l}_{i,k}^i - T\mathbf{z}_k, \quad i = 1, \dots, N\} \quad (16)$$

영상센서가 실제로 인식한 의미정보의 특징이 비 고유 의미정보 집합  $\mathcal{L}_k$ 의 원소  $\mathbf{l}_{i,k}^i$  중 어떤 것으로부터 유래된 것인지 알 수 없으므로 측정치  $\mathbf{y}_k^i$ 를 특정할 수 없다. 따라서 모든  $\mathbf{y}_k^i \in \mathcal{M}_k$ 에 대해 측정치 가설을 생성하고 이에 따라 측위필터의 잔류치(residue)  $\mathbf{r}_k^i$ 를 계산할 수밖에 없다.

$$\mathbf{r}_k^i = \mathbf{y}_k^i - \bar{\mathbf{y}}_k, \quad i = 1, \dots, N \quad (17)$$

여기서  $\bar{\mathbf{y}}_k = H\bar{\mathbf{x}}_k$ 는 측위필터의 사전추정치  $\bar{\mathbf{x}}_k$ 로 정의된 예측측정치를 의미한다.

식 (12)를 식 (17)에 대입하면 잔류치를 센서 측정치와 의미정보의 위치의 함수로 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{r}_k^i = \mathbf{y}_k^i - \bar{\mathbf{y}}_k = \mathbf{l}_{i,k}^i - \mathbf{l}_{i,k} + H(\mathbf{x}_k - \bar{\mathbf{x}}_k) + \mathbf{v}_k \quad (18)$$

여기서  $\mathbf{l}_k$ 는 영상센서가 실제 인식한 의미정보의 절대위치를 의미한다.

식 (18)은 의미정보의 비고유성이 측위 성능에 미치는 영향을 직관적으로 이해하는데 도움을 준다. 사전추정오차  $\bar{\mathbf{e}}_k \equiv \mathbf{x}_k - \bar{\mathbf{x}}_k$  및 측정잡음  $\mathbf{v}_k$ 가 영평균 특성을 만족한다면 잔류치의 기댓값은 식 (18)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$E\{\mathbf{r}_k^i\} = (\mathbf{l}_{i,k} - \mathbf{l}_{i,k}^i) - H \cdot E\{\bar{\mathbf{x}}_k - \mathbf{x}_k\} + E\{\mathbf{v}_k\} = (\mathbf{l}_{i,k} - \mathbf{l}_{i,k}^i) \quad (19)$$

식 (19)에 의해 잔류치의 무편향성이 확보되는 경우는 실제 영상센서가 인식한 의미정보의 절대위치  $\mathbf{l}_{i,k}$ 와 측정치가설  $\mathbf{l}_{i,k}^i$ 이 일치할 때뿐이다. 반대로 잘못된 의미정보의 절대위치  $\mathbf{l}_{i,k}^i \neq \mathbf{l}_{i,k}$ 로 정의된 측정치가설  $\mathbf{y}_k^i$ 는 잔류치  $\mathbf{r}_k^i$ 의 편향성을 유발한다. 잔류치의 편향성은 실제로 인식된 의미정보와 측정치가설  $\mathbf{y}_k^i$ 에 사용된 의미정보 간의 상대거리  $\|\mathbf{l}_{i,k} - \mathbf{l}_{i,k}^i\|$ 가 멀수록 더욱 두드러진다. 결과적으로 잔류치  $\mathbf{r}_k^i$ 의 무편향성을 보장하는 측정치가설  $\mathbf{y}_k^i \in \mathcal{M}_k$ 을 찾아내는 과정은 영상센서에서 인식된 비 고유 특징이 과연 어떤 의미정보  $\mathbf{l}_{i,k}^i \in \mathcal{L}_k$ 로부터 유래된 것인지를 판별하는 문제로 귀결된다.

### 2.2.2 측정치가설 평가

전술한 측정치가설 평가문제는 일종의 자료연관 문제로 이해될 수 있다. 사전추정오차  $\bar{\mathbf{e}}_k = \bar{\mathbf{x}}_k - \mathbf{x}_k$ 가 평균이 0이고 공분산이  $\bar{P}_k$ 인 정규분포를 따른다면, 식 (18)에 정의된 잔류치  $\mathbf{r}_k^i = \mathbf{y}_k - \bar{\mathbf{y}}_k^i$ 의 공분산을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$S_k^i = cov\{\mathbf{r}_k^i\} = S_k + \Delta S_k^i \quad (20)$$

여기서

$$S_k = H\bar{P}_kH^T + R_k, \quad \Delta S_k^i = (\mathbf{l}_{i,k}^i - \mathbf{l}_{i,k})(\mathbf{l}_{i,k}^i - \mathbf{l}_{i,k})^T$$

수식 전개를 간략히 하기 위해, 잔류치  $\mathbf{r}_k^i$ 의 공분산  $S_k^i$ 로 정규화 된 예측측정치  $\bar{\mathbf{y}}_k$ 와 측정치가설  $\mathbf{y}_k^i$  간의 통계적 거리  $d_k^i$  (Mahalanobis distance)를 생각해보자.

$$d_k^i = (\mathbf{y}_k - \bar{\mathbf{y}}_k^i)^T (S_k^i)^{-1} (\mathbf{y}_k - \bar{\mathbf{y}}_k^i) \quad (21)$$

영상센서에서 실제로 인식된 의미정보의 절대위치  $\mathbf{l}_k$ 를 알 수 없으므로  $S_k$ 와 달리  $\Delta S_k^i$ 는 미지의 행렬이다.  $\Delta S_k^i$ 를 무시하고 가용 행렬  $S_k$ 만을 이용하여  $d_k^i$ 를 근사하면 식 (22)를 얻는다. 이때, 식 (20)로부터  $\Delta S_k^i$ 가 양한정 행렬임이 자명하므로 근사치  $\bar{d}_k^i$ 는 통계적 거리  $d_k^i$ 에 비해 항상 같거나 큰 값을 갖는다.

$$\bar{d}_k^i = (\mathbf{y}_k - \bar{\mathbf{y}}_k^i)^T (S_k)^{-1} (\mathbf{y}_k - \bar{\mathbf{y}}_k^i) \geq d_k^i \quad (22)$$

영상센서가 실제로 인식한 의미정보와  $i$ 번째 측정치가설에 사용된 의미정보의 절대위치가 같아지는 ( $\mathbf{l}_{i,k} = \mathbf{l}_{i,k}$ ) 사건을  $\eta_k^i$ 라고 정의하자. 이 경우,  $S_k^i = S_k$ ,  $E\{\mathbf{r}_k^i\} = 0$ 이므로 측정치  $\mathbf{y}_k$ 의 우도 함수는 다음 조건부 확률밀도함수가 된다.

$$p(\mathbf{y}_k | \mathbf{Y}^{k-1}, \eta_k^i) = N(\mathbf{y}_k; \bar{\mathbf{y}}_k^i, S_k) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |S_k|}} \exp\left(-\frac{1}{2} d_k^i\right), \quad n = 2 \quad (23)$$

위의 식에서  $\mathbf{Y}^{k-1}$ 은 AGV의 이동궤적 상에서 영상센서가  $k-1$  시점까지의 획득한 측정치를 누적한 것을,  $N(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}, \Sigma)$ 는  $n$ 차원 불규칙벡터  $\mathbf{x}$ 가 평균  $\boldsymbol{\mu}$ , 분산  $\Sigma$ 인 정규분포를 따른다는 의미이다.

식 (23)으로부터 측정치가설  $\mathbf{y}_k^i$ 이 영상센서에서 인식된 의미정보  $\mathbf{l}_{i,k}$ 와 연관될 때 조건부확률  $p(\mathbf{y}_k | \mathbf{Y}^{k-1}, \eta_k^i)$ 이 최대가 됨을 알 수 있다. 이러한 성질을 이용하면 측정치가설 평가를 통해 어떤 의미정보가 실제로 영상센서에 의해 인식된 것인지 손쉽게 알아낼 수 있다. 자료연관 개념을 활용한 측위필터(그림 1)의 세부 알고리즘은 다음과 같다.

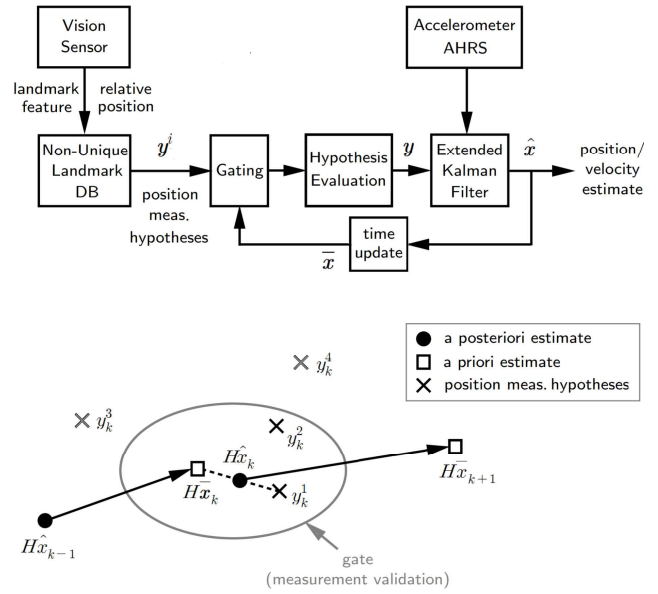


그림 1 자료연관 개념을 활용한 측위필터 구조

Fig. 1 Data association approach to localization filter design

#### 1단계) 유효 측정치가설 산출(gating)

잔류치  $\mathbf{r}_k^i$ 가 정규분포를 따른다면 식 (21)의 통계적거리  $d_k^i$ 는  $\chi^2$ -분포를 따르므로  $\chi^2$ -검정을 통해 일차적으로 유효 측정치가설을 취사선택하는 게이팅(gating)을 수행한다.

$$\bar{V}_k(\gamma) = \{\mathbf{y}_k^i | (\mathbf{r}_k^i)^T (S_k^i)^{-1} (\mathbf{r}_k^i) \leq \gamma\} \quad (24)$$

여기서  $\gamma$ 는 게이트 크기를 의미한다.

#### 2단계) 측정치가설 평가

유효 측정치가설이 다수 존재하는 경우에는 이들 중 어떤 측정치를 이용하여 측위필터의 측정치 갱신을 수행할지 결정해야 한다. 전술한 바와 같이 확률적거리가 가장 짧은 경우에 식 (23)의 조건부확률  $p(\mathbf{y}_k | \mathbf{Y}^{k-1}, \eta_k^i)$ 이 최댓값을 가지므로, 이를 기준으로 최근린(NN: nearest neighbor) 기법에 기초하여 측정치가설을 평가한다[13]. 즉, 최적 측정치가설  $\mathbf{y}_k$ 는  $\bar{V}_k(\gamma)$ 를 최소화하는 측정치가설  $\mathbf{y}_k^i$ 로 정의된다.

#### 3단계) 측정치 갱신

일단 최적 측정치가설  $\mathbf{y}_k$ 이 산출되면 이를 이용하여 식 (13)과 같이 측위필터의 측정치갱신을 수행한다.

#### 4단계) 시간 갱신

다음 측정치가 획득될 때까지 식 (14)의 시간갱신을 수행하고, 1~3단계 과정을 반복 적용한다.

표 1 장착센서 규격

Table 1 Sensor specification

항목(모델)	규격	
가속도계 (Xsense MTi-G)	- 잡음 밀도	$80[\mu g/\sqrt{Hz}]$
	- 잡음 표준편차	$0.0152[m/s^2]$
	- 샘플링 주기	$2.5[ms]$
AHRS (InertialLab II-P)	- 헤딩오차 RMS	$\leq 0.6^\circ$
	- 롤/피치오차 RMS	$\leq 0.3^\circ$
	- 샘플링 주기	$5[ms]$
카메라 (FLIR BLFY-U3)	- 이미지 해상도	$640 \times 480[px]$
	- 프레임 속도	$30[fps]$
	- 초점거리	$8.32875[mm]$
GPS/INS (Xsense MTi-G)	- 위치오차 표준편차	$2.0[m]$
	- 속도오차 RMS	$0.1[m/s]$
	- 샘플링 주기	$2.5[ms]$



그림 2 시험차량 및 센서구성

Fig. 2 Test ground vehicle and sensor configuration

### 3. 비고유 의미정보를 이용한 측위필터 성능분석

제한한 기법의 유용성을 확인하기 위해 시험차량(그림 2)을 이용하여 실 도로 주행시험을 수행하였다. 시험에 사용된 차량에는 가속도계, AHRS와 스테레오 영상센서가 장착되어 있으며, 오차 분석을 위해 GPS/INS가 추가 탑재되었다. 장착된 센서의 주요 제원을 표 1에 정리하였다.

시험차량은 사전에 설정된 궤적을 따라 주행하면서 영상센서로 비 고유 의미정보를 인식한다. 표 2는 비 고유 의미정보의 종류, 밀도, 그리고 시험궤적 상의 출현횟수를 정리한 것이다. 비 고유 의미정보의 분포와 주행 중 영상센서로 실제 검출된 의미정보의 특징은 그림 3에 도시한 바와 같다. 상대적으로 총 개수가 적은, 즉 밀도가 낮은 비 고유 의미정보인 어린이보호구역(◇), 유턴(\*), 60km/h 속도제한(○) 표지판이 시나리오에 여러 번 검출될수록 측위필터 성능에 유리한 조건이 형성될 가능성이 높다. 이는 2.2절의 측정치기설 평가에 더 유리한 조건이 형성되기 때문이다. 가급적 약 조건 하에서 성능분석이 이루어지도록 본 논문에서는 상대적으로 밀도가 높은 비 고유 의미정보가 더 자주 출현하는 궤적을 선정하였다. 시간에 따른 시험차량의 수평면 위치 및 속도는 그림 4와 같다.

표 2 비 고유 의미정보의 데이터베이스

Table 2 Non-unique landmark database

종류	기호	총 개수	출현 횟수	종류	기호	총 개수	출현 횟수
	◇	8	2		☆	23	5
	*	10	1		△	25	7
	○	11	4		×	40	8
	□	15	7		+	93	13

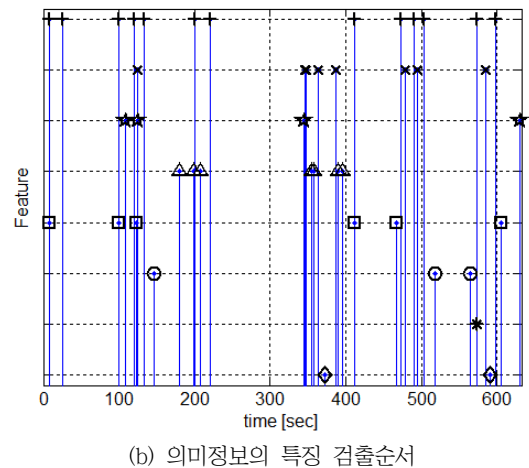
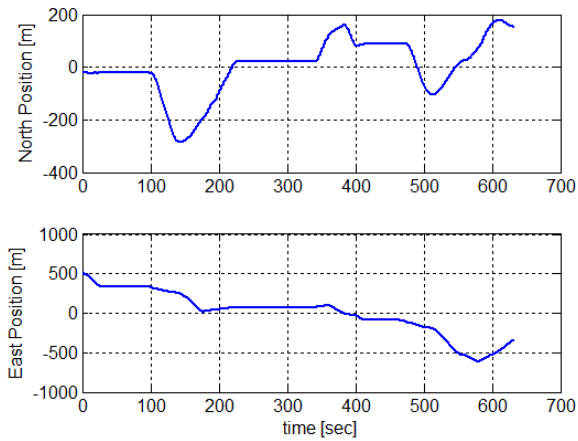


그림 3 비 고유 의미정보 분포

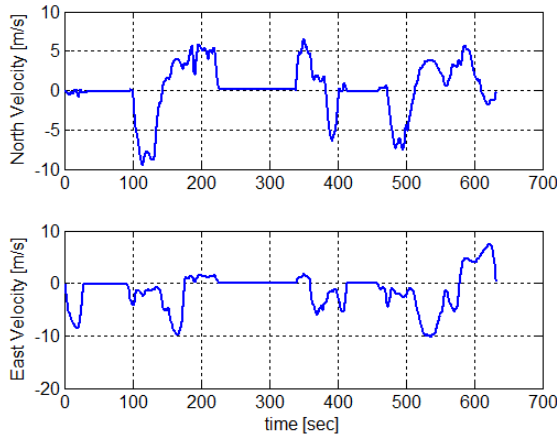
Fig. 3 Distribution of non-unique landmarks

#### 3.1 주행시험 결과

주행시험을 통해 영상센서에 의해 인식된 의미정보의 절대위치를 그대로 사용한 측위필터(ideal: unique feature)와 의미정보의 비고유성을 고려하여 설계된 제안된 측위필터(proposed:



(a) 수평면 위치



(b) 수평면 속도

그림 4 수평면 궤적

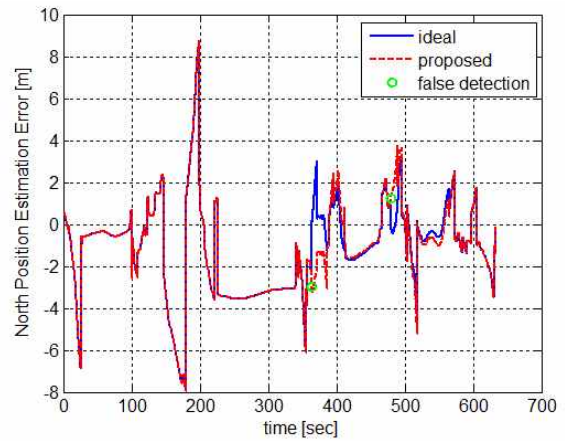
Fig. 4 Horizontal trajectory

non-unique feature)에 의한 위치/속도 추정오차를 비교하였다. 이때 고유 의미정보를 사용한 측위필터의 성능을 제안된 방법이 낼 수 있는 사실상의 성능 상한으로 간주해도 무방하다.

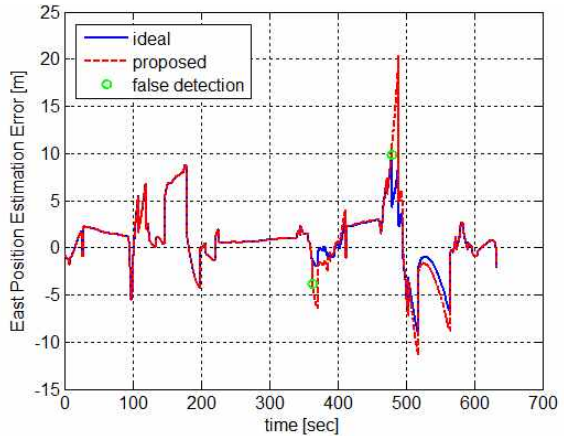
주행시험 시 사용된 측위필터 설계변수는 다음과 같다. 참고로 측정잡음 분산은 영상센서로 의미정보의 특징을 검출할 수 있는 최대거리에서의 측정오차를 기준으로 산출된 값이다.

- 공정잡음 분산  $Q = \text{diag}(0, 0, (0.005\text{m/s})^2, (0.005\text{m/s})^2)$
- 측정잡음 분산  $R_p = \text{diag}((3\text{m})^2, (3\text{m})^2)$
- 게이트크기  $\gamma = 11.9$

시험을 통해 산출된 측위필터의 추정오차를 그림 5~6에 도시하였다. 기존 방법과 제안된 방법의 추정오차는 GPS/INS 출력을 기준으로 산출되었는데, GPS/INS가 포함하고 있는 오차(표준편차 약 2m)로 인해 필터 추정오차의 정확한 값을 분석하는 데에는 다소간의 한계가 존재한다. 그림에도 불구하고 만일 제안된 방법이 기존 방법과 대등한 성능을 제공한다면, 3.2절에서 제시



(a) 정북 위치 추정오차

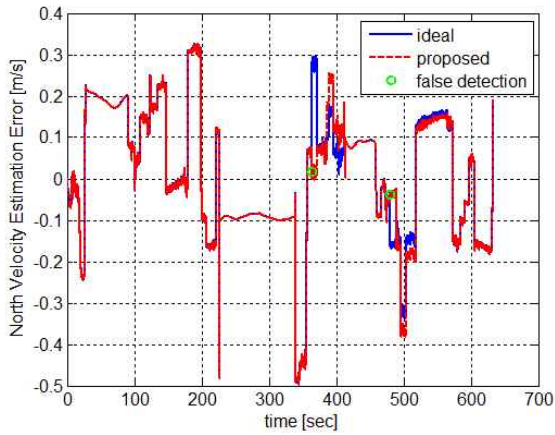


(b) 정동 위치 추정오차

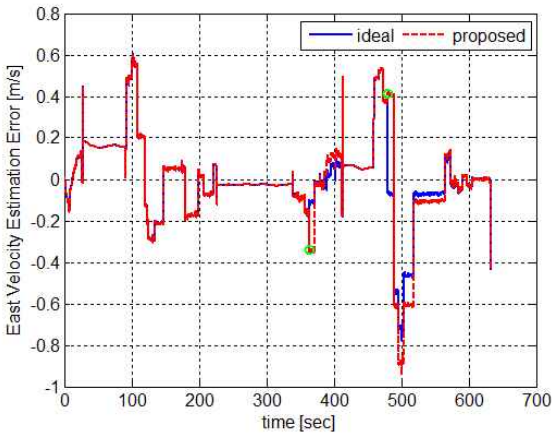
그림 5 위치추정 오차

Fig. 5 Position estimation error

한 측정치가설 평가기법 의해 의미정보의 비 고유성이 적절히 다루어지고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 제안된 방법은 기존 방법과 거의 동일한 측위 성능을 보인다. 다만, 363.5초 및 479초를 기점으로 제안된 기법의 정동 방향 위치와 속도 추정오차가 상대적으로 커지는 현상이 관찰된다. 이 시점은 모두 최근린 자료연관기법에 의해 선택된 비 고유 의미정보 및 이를 이용한 AGV 위치 측정치가 실제와 다를 때이다. 그림 3으로부터 이때의 비 고유 의미정보는 주정차 혹은 주차금지(표 2의 x)에 해당함을 알 수 있다. 363.5초에서 측정치가설과 게이트는 그림 7과 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이 게이트 내에 동일 특징을 갖는 표지판이 두 개 위치하므로 제안된 방법을 사용하더라도 정상적으로 측정치가설의 평가 및 측정치 취사선택 과정에서 오류 발생의 가능성도 그만큼 높아지게 된다. 실제로 영상센서가 인식한 표지판보다 더 가까이 존재하는 다른 표지판으로 인해 측정치 선택오류가 발생하며, 이로 인해 해당 구간에서 측위오차가 증가한다. 문제가 된 시점부터 제안된



(a) 정북 속도 추정오차



(b) 정동 속도 추정오차

그림 6 속도추정 오차

Fig. 6 Velocity estimation error

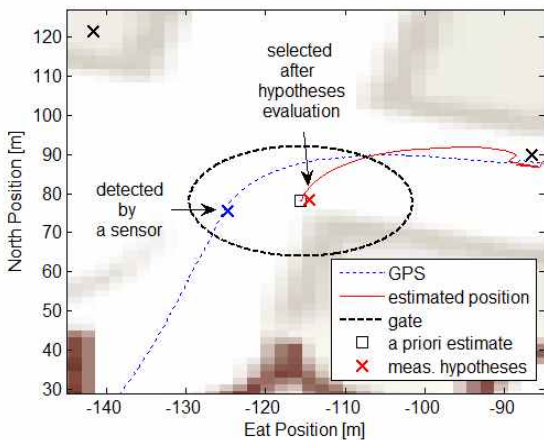


그림 7 측정치 선택오류 상황 (363.5초)

Fig. 7 False measurement detection (at 363.5sec)

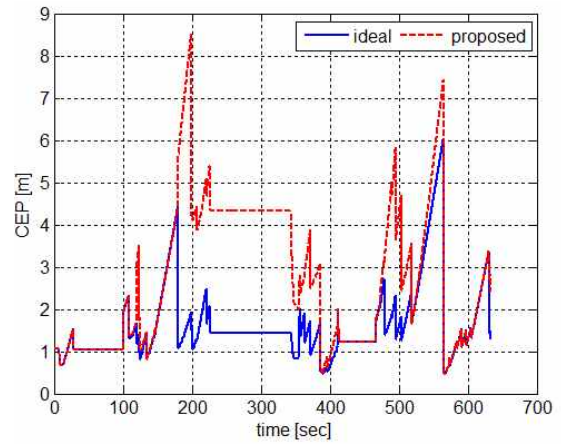


그림 8 수평면 위치추정치의 원형공산오차

Fig. 8 CEP of horizontal position estimates

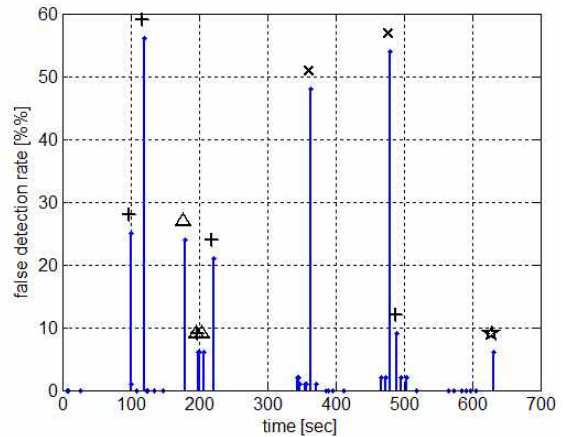


그림 9 측정치 선택 오류확률

Fig. 9 Probability of false measurement detection

측위필터의 추정오차는 서서히 줄어들다가 약 50초가 경과한 이후에는 이상적인 경우와 동일한 추정성능을 보임에 주목할 필요가 있다. 이는 400초 및 510초 시점에서의 주행경로 부근에 존재하는 상대적으로 밀도가 낮은 어린이보호구역(◇), 비보호(□) 및 60km/h 속도제한(○) 표지판을 활용하여 측위오차를 효과적으로 제거할 수 있기 때문이다. 의미정보가 매우 간헐적으로 검출 됨에도 불구하고 이 구간을 제외한 나머지 영역에서 위치 추정오차는 10m 이하를 유지한다. 이는 제한한 방법이 임무수행 지역에 대한 사전정보가 매우 부족한 최악의 조건에서도 AGV의 측위문제에 해결을 위한 차선택이 될 수 있음을 보여주는 결과이다.

### 3.2 자료연관 성능과 측위성능 간의 상관관계

측위필터의 오차를 유발하는 요인을 보다 면밀히 살펴보기 위



해, 장착센서 규격 및 주행궤적을 감안하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하고 100회 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 측위필터에 의해 산출된 수평면 위치추정치의 원형공산오차(CEP: circular error probability)를, 그림 8은 제안된 기법을 적용했을 때 측정치가설이 비정상적으로 선택된 경우의 확률을 각각 그린 것이다. 모의실험 결과 고유 의미정보를 사용하는 이상적인 측위필터는 150초 및 550초 부근을 제외하면 대체로 약 2m 내외의 CEP를 보인다. 제안된 기법은 이상적인 측위필터에 비해 180초와 480초 부근에서 다소간의 성능저하가 있는 것으로 관찰되지만 그 이외의 구간에서는 대동소이한 측위성능을 제공한다. 이는 최근린 자료연관에 기초한 측정치 가설검증 과정에서 다른 비 고유 의미정보에 비해 총 개수가 상당히 많은 횡단보도( $\Delta$ ) 및 신호등(+)에 대한 오 선택 가능성이 커졌기 때문이다. 이 경우 잘못된 측정치의 사용으로 순간적으로 측위오차가 증가되지만, 비 고유 의미정보가 추가로 검출되면서 일시적으로 증가했던 측위오차 역시 점차 줄어드는 경향을 보인다. 이는 3.1절의 주행 시험과도 일치하는 것으로, 제안된 기법을 이용한 측위필터의 성능제고를 위해 적절한 밀도를 갖는 비 고유 의미정보의 선택이 중요함을 암시한다. 이러한 분석결과에 따라, 실제 상황에서 제안된 기법의 현실성을 확보하기 위해 추후 확률적 자료연관 기법(PDA: probabilistic data association)의 적용을 추후 적극적으로 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다[14].

#### 4. 결 론

본 논문에서는 GNSS의 도움을 받을 수 없는 상황에서 의 AGV 측위문제를 다루었다. 일반적인 경우와 달리 임무수행지역에 대한 사전정보의 부족으로 인해 의미정보에 고유 특징을 부여할 수 없는 경우를 고려하였다. 이 경우, 인식된 특징과 의미정보의 절대위치 사이의 일대다 대응관계가 가져오는 측정치의 모호성으로 인해 필연적으로 측위필터에 활용되는 측정치를 유일하게 결정할 수 없다. 의미정보의 비 고유성이 야기하는 문제를 체계적으로 해결함과 동시에 실시간 구현 가능성을 감안하여 최근린 자료연관 기법을 이용한 측정치 가설 검증기법을 제시되었다. 제안된 방법을 사용하는 경우, 비 고유 특징을 지닌 의미정보를 사용하더라도 만족할 만한 측위성능을 얻을 수 있음을 실도로 주행 시험을 통해 확인하였다. 제안된 기법은 추후 GNSS 활용이 불가능하고, 대상지역에 대한 사전 정보가 극히 제한적인 상황에서 임무를 수행해야 하는 AGV의 측위필터 설계문제에 대한 실제적 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한동대학교 교내연구지원사업 제20160091에 의한 것임.

#### References

- [1] C.F. Olson, "Probabilistic self-localization for mobile robots", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 2000, pp. 55-66.
- [2] D. Titterton, J. L. Weston, and J. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, 2nd ed., The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [3] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, Probabilistic Robotics. MIT press, 2005.
- [4] T. Saito, K. Kiuchi, and Y. Kuroda, "Mobile robot localization system in frequent GPS-denied situations", *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2014.
- [5] C. Brand, M.J. Schuster, H. Hirschmüller, and M. Suppa, "Submap matching for stereo-vision based indoor/outdoor SLAM", *IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robotics and Systems*, 2015.
- [6] M. Betke, and L. Gurvits, "Mobile robot localization using landmarks", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1997, pp. 251-263.
- [7] G. Dissanayake, P. Newman, H.F. Durrant-Whyte, S. Clark, and M. Csobor, "A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 2001, pp. 229-241.
- [8] S. Se, D.G. Lowe, and J.J. Little, "Vision-based global localization and mapping for mobile robots", *IEEE Trans. Robotics*, 2005, pp. 364-375.
- [9] A.I. Mourikis, N. Trawny, S.I. Roumeliotis, A.E. Johnson, A. Ansar, and L. Matthies, "Vision-aided inertial navigation for spacecraft entry, descent, and landing", *IEEE Trans. Robotics*, 2009, 264-280.
- [10] D. Scaramuzza, and F. Fraundorfer, "Visual odometry, Part I: The first 30 years and fundamentals", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2011, pp. 80-92.
- [11] P. Jensfelt, and S. Kristensen, "Active global localization for a mobile robot using multiple hypothesis tracking", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 2001, pp. 748-760.
- [12] D. Ronzoni, R. Olmi, C. Secchi, and C. Fantuzzi, "AGV global localization using indistinguishable artificial landmarks", *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, 2011, pp. 287-292.
- [13] Y. Bar-Shalom, Tracking and Data Association, Elsevier Science, 1988.
- [14] Y. Bar-Shalom, F. Daum, and J. Huang, "The probabilistic data association filter: Estimation in the presence of measurement origin uncertainty", *IEEE Control Systems Magazine*, 2009, pp. 82-100.

## 저 자 소 개



### 김 찬 영 (Chan Yeong Kim)

2017년 한동대학교 기계제어공학부(공학사),  
2017년~현재 동대학원 기계제어공학과 석사  
과정. 관심분야는 자율이동체 항법 및 제어,  
충돌방지, M&S 등.



### 홍 다니엘 (Daniel Hong)

2018년 한동대학교 기계제어공학부(공학사),  
2018년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공  
학부 석사과정. 관심분야는 자율이동체 항법  
및 제어기법 등.



### 나 원 상 (Won-Sang Ra)

1998년, 2000년, 2009년 연세대학교 전기공  
학과(공학사), 전기컴퓨터공학과(공학석사),  
전기전자공학과(공학박사). 2000년~2009년  
국방과학연구소 유도조종부 선임연구원.  
2009년~현재 한동대학교 기계제어공학부  
부교수. 2015년 2월~2016년 2월 Cranfield  
University 방문교수. 관심분야는 강인 상태  
추정 이론, 표적추적필터, 유도조종기법 등.